Experimentelle Untersuchungen zur Messung des Stoffübergangs an frei aufsteigenden Gasblasen

Dissertation
zur
Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur

der
Fakultät für Maschinenbau
der Ruhr-Universität Bochum

von

Marius Nüllig

aus Wuppertal

Bochum 2016

Dissertation eingereicht am: 14.11.2016

Tag der mündlichen Prüfung: 19.12.2016

Erster Referent: Prof. Dr.-Ing. F. Peters

Zweiter Referent: Prof. Dr.-Ing. P. Ehrhard

Berichte aus der Strömungstechnik

Marius Nüllig

Experimentelle Untersuchungen zur Messung des Stoffübergangs an frei aufsteigenden Gasblasen

Shaker Verlag
Aachen 2017

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2017
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5166-7
ISSN 0945-2230

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im strömungsmechanischen Labor von Herrn Professor Peters an der Fakultät für Maschinenbau der Ruhr-Universität Bochum. Herrn Professor Peters möchte ich für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die hervorragende Betreuung großen Dank aussprechen. Der gemeinsame und lebhafte Austausch war für mich stets eine wichtige Bereicherung. Die starke wissenschaftliche Atmosphäre und die Möglichkeit der freien Entfaltung darin waren immer eine große Motivation.

Herrn Professor Ehrhard von der TU Dortmund danke ich sehr für die freundliche Übernahme des Koreferates. Herrn Professor Hartmaier danke ich herzlich für den Vorsitz in meinem Promotionsverfahren.

Mein sehr lieber Dank gilt Frau Beitz für ihre unermüdliche Hilfe bei der Literaturbeschaffung, sogar über ihren Renteneintritt hinaus. Herrn Meyer und Herrn Schönhoff danke ich sehr für ihre erfahrene technische Unterstützung. Die Besorgung von Bauteilen sowie Mitwirkung bei elektrischen Anlagen und technischen Zeichnungen liefen stets reibungslos und mit großer Sorgfalt.

Weiterer großer Dank richtet sich an das Team der Institutswerkstatt unter Leitung von Herrn Christian Gramann, deren stets exzellente Arbeit ein wichtiger Grundpfeiler der Experimente war.

Ich danke dem Mercator Research Center Ruhr (MERCUR) für die finanzielle Unterstüzung des Forschungsprojektes.

Die sehr kollegiale und freundschaftliche Zusammenarbeit mit den Lehrstühlen *Hydraulische Strömungsmaschinen*, *Verfahrenstechnische Transportprozesse* und *Feststoffverfahrenstechnik* habe ich immer sehr zu schätzen gewusst.

Für die fachliche sowie nicht-fachliche Diskussion danke ich Dr.-Ing. Kamran Azizi. Für ihre Hilfe beim Korrekturlesen danke ich Florian Schneider, Robert Truse und Tim Groß. Des Weiteren danke ich noch den fleißigen und treuen studentischen Hilfskräften Alexandra Jablonowsky, Sören Kunde und Christian Els.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meinen Freunden, einige davon wurden bereits erwähnt, und bei meiner Familie für deren stetes liebes Geleit bedanken. Ihnen ist diese Arbeit gewidmet.

Kurzfassung

Die Stoffübertragung an aufsteigenden Gasblasen spielt in der Verfahrenstechnik eine wichtige Rolle. Dabei ist die Kenntnis über die Aufstiegsgeschwindigkeit und Diffusion der Blasen (einschließlich Konvektion) von besonderem Interesse. In der Literatur sind zu diesen beiden Größen für den Spezialfall der diffundierenden Einzelblase nur wenige Messdaten vorhanden, da die bisher verwendeten Messapparaturen aufwendig sind.

In der vorliegenden Arbeit werden Einzelblasen mit Hilfe der Drehkammertechnik untersucht. Die Blasen werden dazu in einem rotierenden Zylinder levitiert, der vollständig mit einer Flüssigkeit gefüllt ist. Die Beobachtung der Blase erfolgt von außen mit einer Kamera. Die Diffusion des Blasengases in die Flüssigkeit wird durch Untersättigung erreicht und anhand der Veränderung der Blasengröße gemessen. Zu jeder Blasengröße wird gleichzeitig die Aufstiegsgeschwindigkeit erfasst, die sich aus der Levitationsposition der Blase ergibt. Es wird die Diffusion von fünf Gasen in zwei Flüssigkeiten untersucht. Die verwendete Flüssigkeit ist dafür zu unterschiedlichem Grade mit Gas angereichert.

Zu Beginn wird der freie Blasenaufstieg untersucht. Anschließend wird geprüft, ob es einen Einfluss von Wänden oder anderen Blasen auf Aufstiegsgeschwindigkeit und Diffusion gibt. Die große Variation der Stoffsysteme und Einflüsse kann deshalb erreicht werden, weil die Drehkammer einen einfachen Aufbau hat und flexibel einsetzbar ist.

Für die Beschreibung der Aufstiegsgeschwindigkeit und Diffusion werden dimensionslose Modellgleichungen aufgestellt, die mit Gleichungen aus der Grenzschichttheorie zur Anströmung von Kugeln verglichen werden. Neben Theoriegleichungen, bei denen die Kugel eine feste, immobile Oberfläche besitzt, werden auch Gleichungen für Kugeln mit beweglicher, mobiler Oberfläche herangezogen.

Die Untersuchung der Aufstiegsgeschwindigkeit wird durch die Messung schnell aufsteigender Blasen in Wasser sowie durch die Untersuchung aufsteigender und absinkender Tropfen ergänzt - Diffusion ist nicht vorhanden. Bei den schnellen Blasen zeigt sich ein Übergang der Aufstiegsgeschwindigkeit von schnell nach langsam. Die Untersuchung der Tropfen findet in einer temperierten Flüssigkeitssäule mit verschiedenen Tropfenfluiden statt.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur **III**

1 Einleitung **1**

1.1 Motivation . . . 1

1.2 Technik . . . 2

1.3 Stand des Wissens . . . 2

1.4 Zielsetzung . . . 4

2 Theoretische Grundlagen **7**

2.1 Erstes und zweites Fick'sches Gesetz . . . 7

2.2 Eindimensionale Diffusion . . . 8

2.2.1 Ebene eindimensionale Diffusion . . . 8

2.2.2 Eindimensionale Diffusion um eine Kugel . . . 9

2.3 Zusammenfassung dimensionsloser Kennzahlen . . . 11

2.4 Literaturgleichungen zur Kugelanströmung . . . 16

2.5 Referenzfall angeströmte, diffundierende Platte . . . 18

2.5.1 Platte ohne Wandbindung . . . 19

2.5.2 Platte mit Wandbindung . . . 21

2.6 Stoffübergang beim Blasenaufstieg . . . 24

3 Experimente **27**

3.1 Drehkammer . . . 27

3.2 Drehkammer mit kleinem Wandabstand . . . 33

3.3 Flüssigkeitssäule . . . 35

3.4 Kalibrationsspritze . . . 36

3.5 Wasserkonditionierung . . . 40

3.6 Ölkonditionierung . . . 43

3.7 Stoffdaten der verwendeten Gase und Flüssigkeiten . . . 46

4 Optik an der Einzelblase **53**

5 Bestimmung der Blasenvolumina **59**

5.1 Konturdetektion und -rotation . . . 59

5.2 Kalibration der Blasenvolumina . . . 61

6 Aufstiegsgeschwindigkeit **67**

6.1 Kleine Blasen in Wasser bis 1,5 mm 68

6.2 Große Blasen in Wasser bis 10 mm 72

6.3 Blasengruppe in Wasser 75

6.4 Blasen in Wasser unter Wandeinfluss 79

6.5 Blasen in Weißöl bis 8 mm 82

6.6 Schnelle Blasen in Wasser 87

6.7 Tropfen in einer Flüssigkeit 103

7 Diffusion **107**

7.1 Kleine Blasen in Wasser bis 1,5 mm 108

7.2 Große Blasen in Wasser bis 10 mm 112

7.3 Blasengruppen in Wasser 116

7.4 Blasen in Wasser unter Wandeinfluss 118

7.5 Blasen in Weißöl bis 8 mm 120

8 Zusammenfassung und Ausblick **127**

Anhang **131**